

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## VLIV VOLNÉHO POVRCHU TĚLESA A GRADIENTNÍ ZMĚNY MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ NA CHOVÁNÍ TRHLINY

INFLUENCE OF A FREE SURFACE AND GRADIENT CHANGE OF MATERIAL PROPERTIES ON A  
CRACK BEHAVIOUR

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

OBOR:

INŽENÝRSKÁ MECHANIKA

AUTOR PRÁCE

Ing. MARTIN ŠEVČÍK

ŠKOLITEL

doc. Ing. LUBOŠ NÁHLÍK, Ph.D.

ŠKOLITEL SPECIALISTA

doc. Ing. PAVEL HUTAŘ, Ph.D.

ÚNOR 2012

**Klíčová slova:**

lomová mechanika, čelo trhliny, rohová singularita, gradientní materiál, metoda konečných prvků

**Keywords:**

fracture mechanics, crack front, vertex singularity, graded material, finite element method

Disertační práce je uložena na oddělení vědy a výzkumu,  
FSI VUT v Brně, Technická 2896/2, 616 62 Brno

© Martin Ševčík, 2012

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně

a

Ústav fyziky materiálů  
Akademie věd České republiky, v. v. i.  
Brno

sevcik@ipm.cz  
tel.: +420 532 290 362

ISBN 80-214-XXX  
ISSN 1213-4198

# **OBSAH**

<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>5</b>
<b>2. ZÁKLADNÍ POJMY LOMOVÉ MECHANIKY.....</b>	<b>5</b>
2.1 Součinitel intenzity napětí .....	5
<b>3. OBECNÉ SINGULÁRNÍ KONCENTRÁTORY NAPĚTÍ.....</b>	<b>7</b>
3.1 Zobecněný součinitel intenzity napětí .....	7
<b>4. MATERIÁLY S GRADIENTNÍ ZMĚNOU MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ.....</b>	<b>8</b>
<b>5. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ PRÁCE .....</b>	<b>9</b>
<b>6. POSTUP ŘEŠENÍ A VYBRANÉ DOSAŽENÉ VÝSLEDKY .....</b>	<b>10</b>
6.1 Popis rychlosti šíření únavové trhliny v blízkosti volného povrchu ...	11
6.2 Zakřivení únavové trhliny.....	14
6.3 Odhad tvaru čela únavové trhliny.....	15
6.4 Chování trhliny v gradientním materiálu.....	19
<b>7. ZÁVĚR .....</b>	<b>23</b>
<b>8. VYBRANÉ PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA .....</b>	<b>26</b>
<b>9. POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>27</b>
<b>10.CURRICULUM VITAE.....</b>	<b>30</b>



# 1. ÚVOD

Předkládaná disertační práce se zabývá popisem chování trhliny v blízkosti materiálové nehomogenity. Chování trhliny je zde popisováno za pomoci postupů lomové mechaniky. U všech studovaných úloh v předkládané práci se předpokládá, že jsou splněny podmínky platnosti lineárně elastické lomové mechaniky.

V práci jsou uvažovány dva limitní případy materiálové nehomogenity. Prvním z nich je rozhraní mezi dvěma materiály M1 a M2. Pokud jsou mechanické vlastnosti materiálu M2 (např. vzduch) zanedbatelné v porovnání s materiálem M1 (např. kov), pak lze rozhraní mezi materiály M1 a M2 uvažovat jako volný povrch tělesa. Druhým limitním studovaným případem materiálového rozhraní je spojitý přechod materiálových vlastností mezi materiály M1 a M2, označovaný jako gradientní změna materiálových vlastností.

Numerické výpočty jsou provedeny pomocí metody konečných prvků v komerčním systému ANSYS.

## 2. ZÁKLADNÍ POJMY LOMOVÉ MECHANIKY

Při použití lomové mechaniky předpokládáme, že studované těleso obsahuje trhlínu, případně defekt typu trhlina. Trhliny jsou singulárními koncentrátory napětí, tedy složky tenzoru napětí ve vrcholu trhliny nabývají teoreticky nekonečných hodnot. Singulární koncentrátor napětí obecně vzniká materiálovou nebo geometrickou nespojitostí případně nespojitostí zatížení [20]. Bylo odvozeno, např. [35], že napětí má, vzhledem ke vzdálenosti  $r$  od vrcholu koncentrátoru napětí, singulární charakter. Singulární pole napětí lze, za předpokladu jedné singularity napětí (např. trhlina kolmá k materiálovému rozhraní), psát následovně:

$$\sigma_{ij} \approx \frac{1}{r^p}, \quad (1)$$

kde charakter singularity je vyjádřen pomocí exponentu singularity napětí  $p$ . Z fyzikálních důvodů se meze hodnoty exponentu singularity napětí pohybují v rozsahu  $p \in (0; 1)$ . Poznamenejme, že  $p$  může být také komplexní číslo, jehož reálná část leží v intervalu  $(0; 1)$ . Pro ostrou trhlínu nacházející se v homogenním materiálu bylo odvozeno, např. [36], že charakter singulárního pole napětí v okolí vrcholu trhliny je úměrný  $r^{-1/2}$ , tedy exponent singularity napětí  $p = 1/2$ .

### 2.1 SOUČINITEL INTENZITY NAPĚTÍ

Pro hodnocení chování těles s trhlínou je třeba znát rozložení napjatosti v okolí vrcholu trhliny. Jednotlivé složky tenzoru napětí vyjadřujeme obvykle v kartézském nebo polárním souřadnicovém systému, jejichž počátek je vždy ve

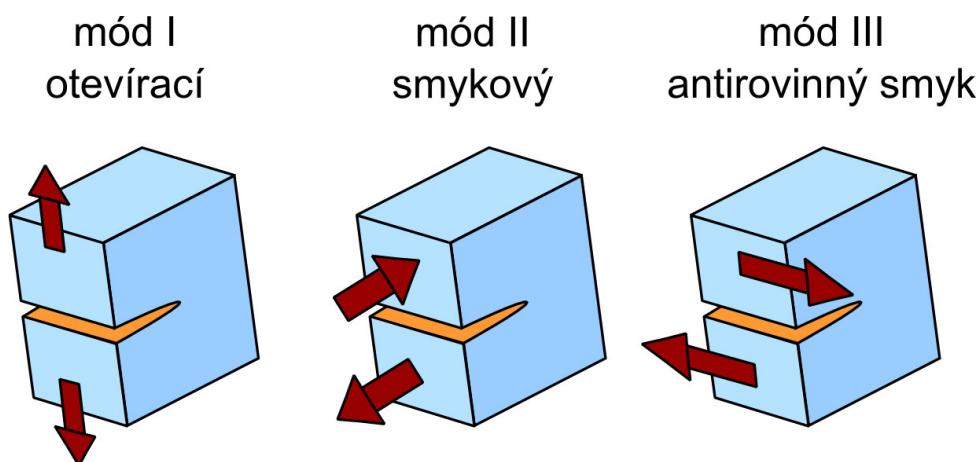
vrcholu trhliny. Uvažujme polární souřadnicový systém  $r, \theta$ . Za předpokladu platnosti LELM je možno pole napětí v blízkosti vrcholu trhliny popsat pomocí Williamsova rozvoje následovně [1]:

$$\sigma_{ij} = \left( \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) \cdot f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta), \quad (2)$$

kde  $\sigma_{ij}$  je tenzor napětí;  $r, \theta$  - jsou polární souřadnice,  $K$  je *součinitel intenzity napětí*, a  $f_{ij}$  je bezrozměrná funkce úhlu  $\theta$ . Pro souřadnici  $r \rightarrow 0$  je tedy první člen rozvoje (2) vždy podstatně větší než všechny ostatní členy, které nabývají pro  $r = 0$  konečných, nebo nulových hodnot. Pole napětí v blízkosti vrcholu trhliny je tedy úměrné  $r^{-1/2}$ . Rozložení posuvů v okolí vrcholu trhliny se mění s  $r^{1/2}$ .

V případě, že zanedbáme vliv vyšších členů rozvoje (2) a jako parametr popisující rozložení napětí v okolí vrcholu trhliny použijeme pouze první člen rozvoje, pak hovoříme o jednoparametrové lomové mechanice.

Obecně se rozlišují tři základní, vzájemně nezávislé módy zatěžování tělesa s trhlinou, každý ve spojitosti s lokálním charakterem posuvů líců trhliny. Každému módu zatížení lze přiřadit součinitel intenzity napětí, který se označuje  $K_I$  (I, II, III) v závislosti na uvažovaném módu namáhání trhliny, viz obr. 1.



Obr. 1. Módy namáhání tělesa s trhlinou

Součinitel intenzity napětí  $K$  lze využít k popisu chování trhliny v tělese. U homogenních těles je součinitel intenzity napětí závislý na geometrii tělesa s trhlinou, délce trhliny, okrajových podmínkách a na zatížení.

### 3. OBECNÉ SINGULÁRNÍ KONCENTRÁTORY NAPĚTÍ

Dosud bylo popisováno chování trhliny v homogenním materiálu, pro kterou je charakteristická singularita napětí před vrcholem trhliny úměrná  $r^{-1/2}$ . Ve skutečnosti je tato konfigurace pouze zvláštním případem tzv. obecných singulárních koncentrátorů napětí, u kterých je singularita napětí úměrná obecně  $r^{-p}$ . Mezi obecné singulární koncentrátory napětí patří např. trhlina s vrcholem na bi-materiálovém rozhraní, kde dochází ke skokové změně materiálových vlastností, ostrý V-vrub, spoj více materiálů aj.

#### 3.1 ZOBECNĚNÝ SOUČINITEL INTENZITY NAPĚTÍ

Pro hodnocení obecných singulárních koncentrátorů napětí již není možné použít klasický součinitel intenzity napětí, protože se již nejedná o singularitu napětí typu  $r^{-1/2}$ , ale o obecnou singularitu napětí typu  $r^{-p}$  [17]. Pro tyto případy je nutné využít zobecněné koncepce součinitele intenzity napětí. Popis napětí v okolí obecného koncentrátoru napětí je pak určen tzv. zobecněným součinitelem intenzity napětí  $H$ . Singulární rozdělení napětí v okolí vrcholu V-vrubu pak bude pro zatěžovací mód I popsáno následovně, např. [13],[36]:

$$\sigma_{ij} = \frac{H_I}{\sqrt{2\pi}} r^{-p} f_{ij}(\alpha, p, \theta), \quad (3)$$

kde  $H_I$  je zobecněný součinitel intenzity napětí pro mód namáhání I,  $p$  je exponent singularity napětí,  $r$  je vzdálenost od vrcholu V-vrubu,  $\alpha$  udává úhel rozevření V-vrubu,  $f_{ij}(\alpha, p, \theta)$  je známá funkce. Pro mód zatěžování I je pak  $f_{ij}(\alpha, p, \theta)$  v polárním souřadnicovém systému  $r, \theta$  [14]:

$$f_{rr} = \left( (2 - p - p^2) \cos(p\theta) - q(2 - 3p + p^2) \cos(2 - p)\theta \right), \quad (4a)$$

$$f_{\theta\theta} = \left( (2 - 3p + p^2) \cos(p\theta) + q(2 - 3p + p^2) \cos(2 - p)\theta \right), \quad (4b)$$

$$f_{r\theta} = \left( p(1 - p) \sin(p\theta) + q(2 - 3p + p^2) \sin(2 - p)\theta \right), \quad (4c)$$

kde konstanta  $q$ :

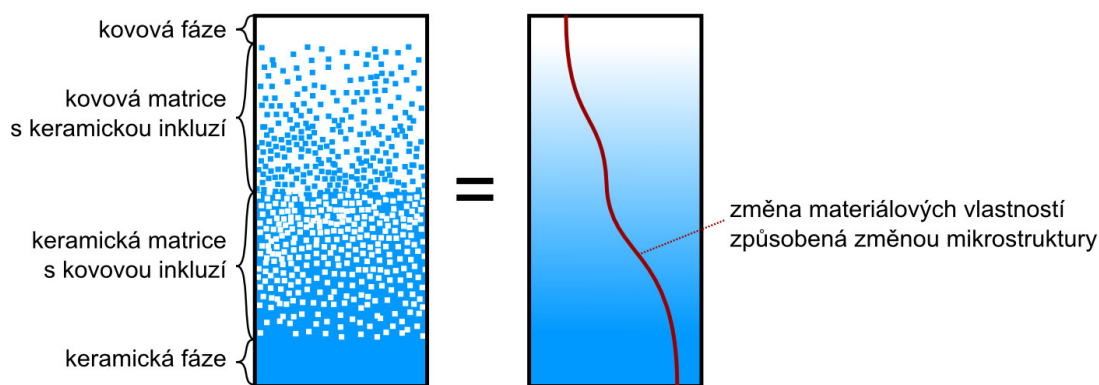
$$q = \frac{-\cos(p(\pi - \alpha))}{\cos((2 - p)(\pi - \alpha))}. \quad (5)$$

Podrobný popis je možné nalézt např. v pracích [13],[14]. Tam je také možné nalézt příslušnou hodnotu  $p$  a  $q$  pro konkrétní úhel rozevření vrubu.

## 4. MATERIÁLY S GRADIENTNÍ ZMĚNOU MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

Další studovanou oblastí je problematika chování trhlin na rozhraní materiálů spojených vrstvou s gradientní změnou materiálových vlastností s přímou aplikací na svary polymerních materiálů.

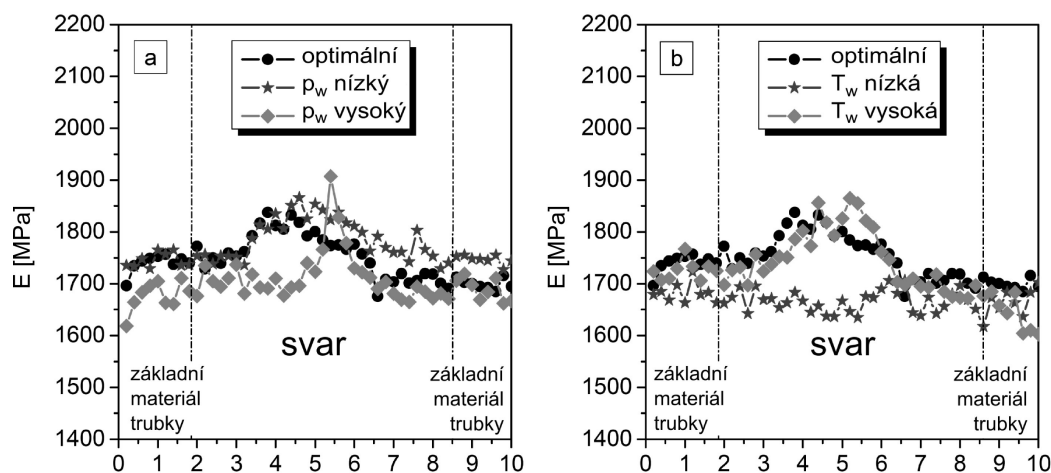
Gradientní materiál je z makroskopického pohledu kompozit, charakteristický změnou složení a struktury napříč svým objemem, což má za následek nehomogenní rozložení materiálových vlastností [19]. Nejjednodušší gradientní materiál tvoří dvě fáze, kdy jedna fáze přechází ve druhou, viz obr. 2. Tento přechod může být spojitý nebo po částech spojitý. Spojitý přechod mezi dvěma fázemi může vzniknout např. pomocí difuze, nespojitý například nanesením vrstev s rozdílným objemovým podílem jednotlivých fází.



Obr. 2. Schema gradientního materiálu

Významná část disertační práce je zaměřena na problematiku porušování gradientních materiálů se speciální pozorností věnovanou svarům polymerních trubek. Polyethylenové (PE) i polypropylenové (PP) trubky, které se používají pro transport vody nebo plynu, se obvykle svařují pomocí tupého svaru [5],[6]. Konce trubek se nahřejí a za působení tlaku se spojí. Kvalitní svar se vyznačuje přibližně stejnou pevností jako základní materiál trubky. V oblasti svarového spoje dochází, díky působení svařovacích podmínek (svařovací teplota, tlak), ke změně mechanických vlastností v porovnání se základním materiálem, viz obr. 3. Ve svaru jsou obvykle vyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu  $E$  než v základním materiálu. Nárůst v případě svaru PE/PE je přibližně 10% avšak pro svar PP/PP dosahuje až 30% [34]. Tento gradient mechanických vlastností může mít značný vliv na chování trhliny iniciované v oblasti svaru, který je potřeba kvantifikovat.





Obr. 3. Vliv změny svařovacího tlaku  $p_w$  a svařovací teploty  $T_w$  na materiálové vlastnosti ve svaru polyethylenových trubek [34]

## 5. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ PRÁCE

Z literárního rozboru vyplývá, že vliv materiálové nehomogenity na lomové chování těles je v řadě úloh klíčové a této problematice je věnována značná pozornost, a to jak z hlediska numerického, tak i fyzikálního. V práci jsou analyzovány dva limitní případy materiálového rozhraní. Na jedné straně je to případ volného povrchu tělesa a na druhé rozhraní, které je tvořené spojitým přechodem materiálových vlastností. Řešení obou těchto konfigurací vyžaduje speciální přístupy a je nezbytné pro řešení celé řady technických problémů.

První část disertační práce je věnována problematice chování trhliny v blízkosti volného povrchu. Hodnocení vlivu rohové singularity na chování trhliny nacházející se v blízkosti volného povrchu je v literatuře diskutovaným tématem, přesto však není stále dostatečně popsána. Rovinné řešení úlohy tělesa s trhlinou často neposkytuje všechny potřebné informace o lomových parametrech. Z tohoto důvodu je potřeba provádět trojdimenzionální simulace s cílem co nejpřesnějšího popisu pole napětí v blízkosti volného povrchu tělesa.

Druhá část práce je zaměřena na studium chování trhliny na rozhraní dvou materiálů, přičemž změna materiálových vlastností je spojitá. Těmito materiály se obecně říká gradientní materiály. Materiálová nehomogenita, vzniklá gradientním přechodem materiálových vlastností, má významný vliv na chování trhliny. Při technologických procesech, například svařování polymerních materiálů, dochází ke změně materiálových vlastností v ovlivněné oblasti. Analytické řešení pro odhad chování trhliny v těchto komplikovaných gradientních strukturách neexistuje a je tedy nutné provádět numerické simulace chování trhliny.

Dílčí cíle práce mohou být uspořádány do následujících skupin:

### ***Stanovení vlivu volného povrchu na chování trhliny***

Pro stanovení vlivu volného povrchu tělesa na chování trhliny je nezbytné:

- Vytvořit 3D model homogenního tělesa s průchozí trhlinou a sledovat vliv volného povrchu na charakter singulárního pole napětí v blízkosti volného povrchu.
- Porovnat singulární pole napětí v homogenním materiálu pro různé tloušťky těles s trhlinou a popsat pole napětí v okolí čela trhliny pomocí zobecněného součinitele intenzity napětí  $H$ .
- Na základě znalosti singulárního pole napětí v okolí vrcholu trhliny, nacházejícím se v blízkosti volného povrchu tělesa popsaném pomocí zobecněného součinitele intenzity napětí  $H$ , vytvořit postup umožňující stanovit efektivní hodnotu součinitele intenzity napětí  $K_{eff}$  v tomto místě.
- Vytvořit metodologii popisu chování trhliny ovlivněné rohovou singularitou a numericky odhadnout skutečný tvar čela únavové trhliny.

### ***Stanovení vlivu gradientní změny materiálových vlastností s ohledem na svarové spoje polymerních materiálů***

Pro stanovení vlivu gradientní změny materiálových vlastností na chování trhliny ve svaru polymerních materiálů je nezbytné:

- Vyhledat a vybrat vhodné postupy vedoucí k efektivnímu numerickému modelování gradientních materiálů z hlediska lomové mechaniky.
- Vytvořit 2D model zkušební vzorku z gradientního materiálu s trhlinou s obecně definovanou funkcí změny materiálových vlastností a porovnat získané hodnoty součinitele intenzity napětí s hodnotami dostupnými v literatuře.
- Aplikovat model gradientního materiálu na problematiku polymerních svarů a složité 3D úlohy.

## **6. POSTUP ŘEŠENÍ A VYBRANÉ DOSAŽENÉ VÝSLEDKY**

Disertační práce je zaměřena na popis vlivu volného povrchu na chování trhliny a na vliv změny materiálových vlastností na lomové parametry trhliny. Důraz v první části je kladen zejména na popis pole napětí v blízkosti místa, kde trhlina protíná volný povrch tělesa. Ukazuje se, že v tomto místě dochází k poklesu rychlosti šíření únavové trhliny a čelo trhliny se zakřivuje. Mechanismus, vedoucí k zakřivení čela trhliny, bude studován na základě znalosti rozdělení napětí před vrcholem trhliny a s využitím zobecněné lineárně elastické lomové mechaniky. Druhá část práce je zaměřena zejména na studium porušování svarových spojů polymerních materiálů jejichž

mechanické vlastnosti jsou ovlivněny technologickými podmínkami svařování. Výsledky uvedené v této disertační práci mohou být zobecněny a aplikovány i na jiné případy, než které jsou zde popsány.

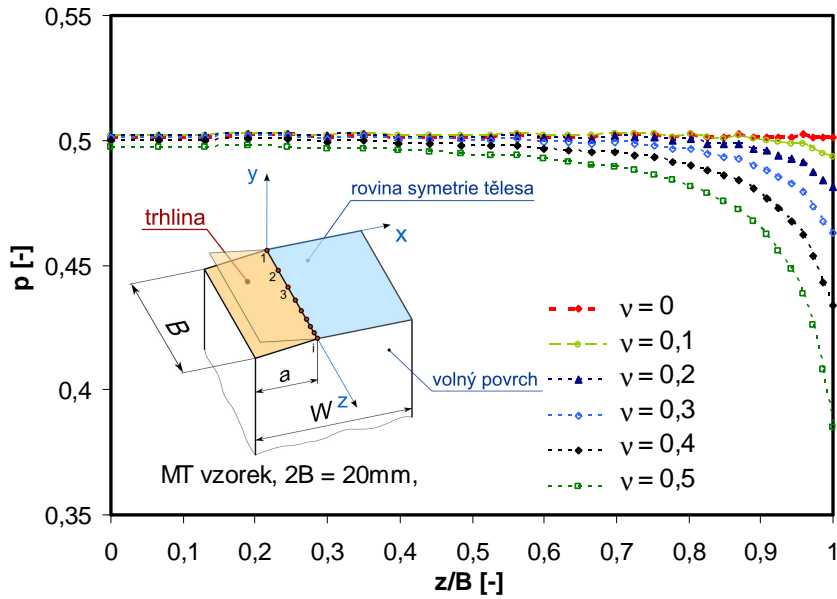
Ke splnění cílů disertační práce je využito numerické modelování. Pro svoji univerzálnost byla zvolena metoda konečných prvků, která je implementována v komerčně dostupném systému ANSYS. Ve všech simulacích je uvažován lineárně elastický materiál, definovaný pomocí modulu pružnosti  $E$  a Poissonova čísla  $\nu$ . Pomocí metody konečných prvků bylo studováno množství úloh, které do značné míry souvisí s řešením disertační práce, např. [4],[7],[8],[9],[12],[16],[18],[32],[33] aj.

Pro popis chování trhliny je využito jednoparametrové, příp. dvouparametrové lineárně elastické lomové mechaniky. Předpokládá se, že všechny studované konfigurace těles s trhlinou splňují podmínky použitelnosti LELM. Pole napětí v okolí trhliny, resp. singulárního koncentrátoru napětí, je tedy popisováno pomocí součinitele intenzity napětí, zobecněného součinitele intenzity napětí a případně T-napětí. K popisu pole napětí v okolí vrcholu trhliny, nacházející se v blízkosti volného povrchu tělesa, je využit popis pole napětí používaný pro V-vrub, který je pro úhel rozevření V-vrubu  $2\alpha = 0$  ekvivalentní s jednoparametrovým popisem pole napětí v okolí vrcholu trhliny v homogenním materiálu.

## **6.1 POPIS RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY V BLÍZKOSTI VOLNÉHO POVRCHU**

Charakter singulárního pole napětí na volném povrchu je ovlivněn hodnotou Poissonova čísla  $\nu$  a velikostí úhlu  $\gamma_r$ , který svírá čelo trhliny s normálou k volnému povrchu [22]. V případě únavové trhliny je úhel  $\gamma_r$  ovlivněn rychlostí šíření únavové trhliny ve studovaném materiálu. Jestliže modelujeme trhlínu s přímým čelem ( $\gamma_r = 0$ ), dochází v blízkosti volného povrchu tělesa k poklesu exponentu singularity  $p$ , viz obr. 4. Míra poklesu vzrůstá společně s Poissonovým poměrem  $\nu$  [7]-[11]. Zřejmý je i nárůst velikosti oblasti ovlivněné volným povrchem.

S pomocí kritéria založeného na hustotě deformační energie  $w$  v okolí čela trhliny je možné tyto výsledky využít pro odhad rychlosti šíření únavové trhliny. Uvažujme dvě trhlíny. První je trhlína s exponentem singularity napětí  $p \neq 0,5$  s odpovídající hodnotou zobecněného součinitele intenzity napětí  $H_I$ . Druhá trhlína je tentokrát s exponentem singularity napětí  $p = 1/2$ , a odpovídajícím efektivním součinitelem intenzity napětí  $K_{eff}$  (v tomto případě platí  $K_{eff} = K_I = K_{RD}$ ). Lze předpokládat, že lomové chování těchto dvou trhlin bude stejné, jestliže hustota deformační energie bude pro obě trhlíny stejná [9].



Obr. 4. Vliv Poissonova čísla na hodnotu exponentu singularity napětí [11]

Hustotu deformační energie  $w$  lze obecně vyjádřit pomocí výrazu:

$$w = (dW_c / dV) = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}, \quad (6)$$

kde  $W_c$  je energie napjatosti akumulovaná v tělese o objemu  $V$ . Uvažováním pouze rovinné úlohy lze hustotu deformační energie vyjádřit jako:

$$w = (dW_c / dV) = \frac{1}{8\mu} \left( k_n (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\sigma_{xy}^2 \right), \quad (7)$$

přičemž pro rovinnou napjatost je:

$$k_n = \frac{1-\nu}{1+\nu}, \quad (8)$$

a pro rovinnou deformaci:

$$k_n = 1 - 2\nu. \quad (9)$$

kde  $\mu$  je modul pružnosti ve smyku,  $\nu$  je Poissonovo číslo a  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  a  $\sigma_{xy}$  jsou složky napětí. V případě, že je trhlina vystavena pouze otevíracímu módu namáhání a uvažujeme-li pouze singulární člen Williamsova rozvoje (2), hustotu deformační energie lze psát ve tvaru:

$$(dW_c / dV) = \frac{1}{r} (a_{11} K_I^2), \quad (10)$$

kde  $K_I$  je součinitel intenzity napětí a  $a_{11}$  může být vyjádřena následovně:

$$a_{11} = \frac{1}{16\pi\mu} [(2k_n + 1 - \cos\theta)(1 + \cos\theta)], \quad (11)$$

kde  $r, \theta$  jsou polární souřadnice s počátkem ve vrcholu trhliny. Připomeňme, že výše popsany postup určení hustoty deformační energie platí pouze pro trhlinu v homogenním materiálu, za předpokladu  $p = 1/2$ . V případech, kdy je

exponent singularity napětí pro trhlinu  $p < 1/2$ , není možné určit hustotu deformační energie pomocí vztahu (10). Chceme-li využít hustotu deformační energie k odhadu rychlosti šíření trhliny např. v blízkosti volného povrchu (kde je  $p < 1/2$ ), je nutné výše popsany postup zobecnit. Vycházíme z předpokladu, že trhlina je v podstatě zvláštní případ V-vrubu, ovšem s úhlem rozevření V-vrubu  $2\alpha = 0^\circ$ . Rychlost šíření trhliny tedy jde posuzovat pomocí hustoty deformační energie určené pro V-vrub s úhlem rozevření V-vrubu  $2\alpha = 0^\circ$ . V práci [8] byly porovnány průběhy tvarových funkcí  $f_{ij}(\theta)$ , určené analyticky pro trhlinu a V-vrub, s numericky odhadnutými tvarovými funkcemi pro trhlinu ovlivněnou přítomností volného povrchu. Byla shledána poměrně dobrá shoda mezi numerickým řešením a průběhy tvarových funkcí platnými pro V-vrub. Z výsledků této práce tedy plyne, že je možné popsat jednotlivé složky napětí v blízkosti čela trhliny, ovlivněné přítomností volného povrchu, s pomocí modelového popisu napětí odvozeným pro V-vrub. V případě V-vrubu, namáhaným normálovým zatěžováním, lze hustotu deformační energie vyjádřit jako [12]:

$$(dW_c / dV) = \frac{1}{r} (A_{11} H_I^2), \quad (12)$$

kde  $H_I$  je zobecněný součinitel intenzity napětí a funkce  $A_{11}$  může být určena následovně:

$$A_{11} = \frac{r^{1-2p}}{16\pi\mu} [k_n U_I + V_I], \quad (13)$$

kde  $p$  je exponent singularity napětí a  $U_I$  a  $V_I$  lze zapsat ve tvaru:

$$U_I = 16(1-p)^2 \cos^2(p\theta), \quad (14)$$

$$V_I = 4 \left[ p^2 (1-p)^2 + q^2 (2-3p+p^2)^2 - 2pq(1-p)(2-3p+p^2) \cos 2\theta \right], \quad (15)$$

kde  $q$  je funkce exponentu singularity napětí  $p$ , viz (5). Porovnáním hustoty deformační energie pro trhlinu a V-vrub získáváme:

$$(dW / dV) = \frac{1}{r} (a_{11} K_I^2) = \frac{1}{r} (A_{11} H_I^2). \quad (16)$$

Rovnice (16) umožňuje najít vztah mezi zobecněným součinitelem intenzity napětí  $H_I$  a efektivním součinitelem intenzity napětí  $K_{eff}$  ve formě [9]:

$$K_{eff} = H_I r_c^{(1/2-p)} \sqrt{\frac{(1-2\nu)U_{I(\theta=0^\circ)} + V_{I(\theta=0^\circ)}}{4(1-2\nu)}}, \quad (17)$$

kde  $r_c$  je poloměr plastické zóny před čelem trhliny, např.:

$$r_c = \frac{1}{3\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_{YS}} \right)^2, \quad (18)$$

kde  $\sigma_{YS}$  je mez kluzu studovaného materiálu. Efektivní součinitel intenzity napětí  $K_{eff}$  je možné využít jako parametr řídící rychlost šíření trhliny v souladu s Parisovým-Erdoganovým vztahem:

$$\frac{da}{dN} = C(K_{eff})^m, \quad (19)$$

kde  $C$  a  $m$  jsou materiálové parametry charakterizující rychlost šíření únavové trhliny ve studovaném materiálu. Rychlost šíření únavové trhliny  $da/dN$  pro obecný singulární koncentrátor napětí ( $p \neq 0,5$ ) lze pak určit ze vztahu:

$$\frac{da/dN}{(da/dN)_{RD}} = \left( \frac{K_{eff}}{K_{RD}} \right)^m, \quad (20)$$

kde  $(da/dN)_{RD}$  je rychlost šíření trhliny za podmínek rovinné deformace,  $K_{RD}$  je součinitel intenzity napětí u trhliny s exponentem singularity napětí  $p = 0,5$ . Pomocí těchto postupů lze určit rychlost šíření únavové trhliny v komplikovaných 3D případech, kde  $p \neq 0,5$ .

V práci [9] byl studován vliv tloušťky zkušební vzorku na rychlost šíření trhliny. Uprostřed každého vzorku byla odhadnuta rychlost šíření trhliny  $da/dN$  a porovnána s hodnotou rychlosti šíření trhliny za podmínky rovinné deformace  $(da/dN)_{RD}$ . Z rovnice (20) plyne, že podíl rychlostí šíření trhliny je úměrný podílu efektivního součinitele intenzity napětí a součinitele intenzity napětí odhadnutého za podmínky rovinné deformace. Ukázalo se, že v případě tenkých vzorků je rychlost šíření trhliny výrazně nižší než u tlustých těles. Tento efekt je patrný zvláště pro materiály s vyšším Poissonovým číslem. Pro vzorky o tloušťce  $2B > 10$  mm je již rychlost šíření trhliny uprostřed vzorku stejná jako v případě stavu rovinné deformace. Tuto skutečnost lze vysvětlit tak, že pro tyto tloušťky tělesa již nedochází k interakci mezi jednotlivými rohovými singularitami a tedy exponent singularity napětí je podél čela trhliny konstantní, přičemž platí  $p = 1/2$ .

## 6.2 ZAKŘIVENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY

Únavová trhlina, startující z rovného čela počáteční trhliny, má tendenci změnit tvar čela trhliny do energeticky výhodného tvaru. Při růstu trhliny dochází k energetickému toku do všech bodů čela trhliny, přičemž je energie spotřebovávána separačním procesem (k vytvoření lomového povrchu).

Je-li energetický tok konstantní po čele trhliny, lze předpokládat, že je zároveň konstantní i rychlost šíření trhliny. V místech, kde je singularita napětí úměrná  $r^{-1/2}$  je možné rychlost šíření únavové trhliny dostatečně dobře odhadnout s pomocí součinitele intenzity napětí využitím Parisova-Erdoganova vztahu (19). V oblasti ovlivněné volným povrchem je však singularita napětí obecně  $r^{-p}$  a tedy je nutné využít zobecněný součinitel intenzity napětí  $H_I$ , který však lze přepočítat pomocí výše popsaného postupu s využitím hustoty deformační energie na efektivní součinitel intenzity napětí

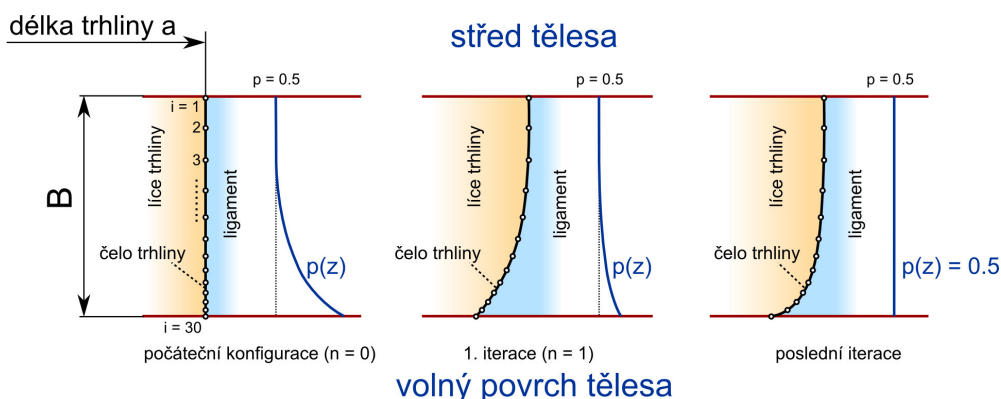
$K_{eff}$ . Známe-li tedy  $K_{eff}$ , jsme schopni odhadnout rychlost šíření trhliny i v blízkosti volného povrchu tělesa. Tímto postupem lze odhadnout skutečný tvar čela šířící se trhliny, a to i v oblasti ovlivněné volným povrchem.

V práci [9] bylo ukázáno, že existuje relace mezi rychlostí šíření trhliny  $da/dN$  a exponentem singularity napětí  $p$ . Výsledky numerických simulací naznačily, že je možné pozorovat závislost mezi rychlostí šíření únavové trhliny a exponentem singularity napětí podél čela trhliny. Pro přímé čelo trhliny je nejmenší rychlost šíření trhliny na volném povrchu. Na základě popsané metodiky využívající  $K_{eff}$  k odhadu rychlosti šíření únavové trhliny plyne [8],[9], že lze odhadovat rychlost šíření únavové trhliny ze znalostí exponentu singularity napětí. Ukázalo se, že v místech kde je exponent singularity napětí  $p < 0,5$  dochází k poklesu rychlosti šíření trhliny. Optimalizací tvaru trhliny tak, aby byla rychlost šíření stejná po celém čele trhliny je možné pozorovat konstantní exponent singularity napětí  $p$  podél čela trhliny. Tento poznatek byl využit v práci [27],[28] při odhadu skutečného tvaru trhliny u MT vzorku.

Tyto úvahy jsou konsistentní s prací Bažanta a Estenssora [2], kteří s pomocí variačních principů hledali takový úhel  $\gamma_r$  při kterém bude  $p = 1/2$ , tedy trhlina bude růst, a to s konstantním energetickým tokem  $E_0$  podél čela trhliny. Bylo zjištěno, že pro materiál s Poissonovým číslem  $\nu = 0,3$  je úhel  $\gamma_r$  přibližně  $11^\circ$ . Je však nutno podotknout, že v jejich práci byla studována trhlina v polonekonečném tělese, kde neexistuje interakce mezi jednotlivými rohovými singularitami.

### 6.3 ODHAD TVARU ČELA ÚNAVOVÉ TRHLINY

V práci [27] byl navržen postup vedoucí k odhadu tvaru čela únavové trhliny pomocí metody konečných prvků. Důraz byl kladen na porovnání zakřivení čela trhliny mezi tenkými a tlustými vzorky a určení úhlu  $\gamma_r$ . Pro konkrétní délku trhliny bylo její čelo postupně zakřívováno tak, aby byl exponent singularity napětí  $p$  konstantní podél celého čela trhliny. Navržený postup je graficky znázorněn na obr. 5.

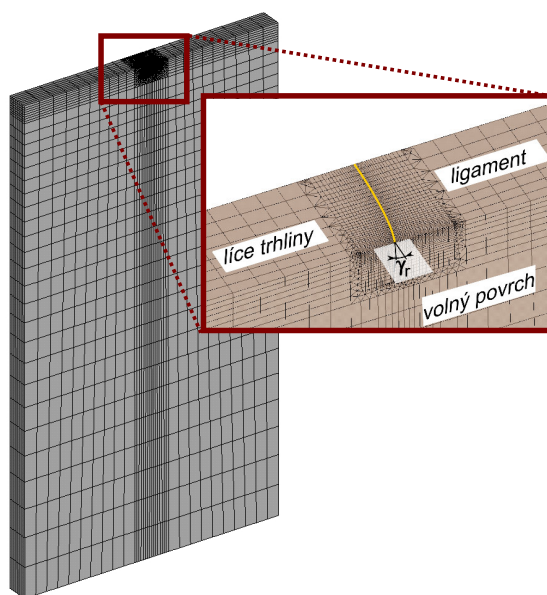


Obr. 5. Znázornění postupu odhadu tvaru čela únavové trhliny

Na počátku je uvažováno přímé čelo trhliny, na němž je odhadnut exponent singularity napětí  $p(z)$ . X-ová souřadnice jednotlivých bodů čela trhliny je pak určována následovně:

$$x_{(n+1)}^{(i)} = x_{(n)}^{(i)} - \left( 1 - \frac{p_{(n)}^{(i)}}{p_{(n)}^{(z=0)}} \right) k_c, \quad (21)$$

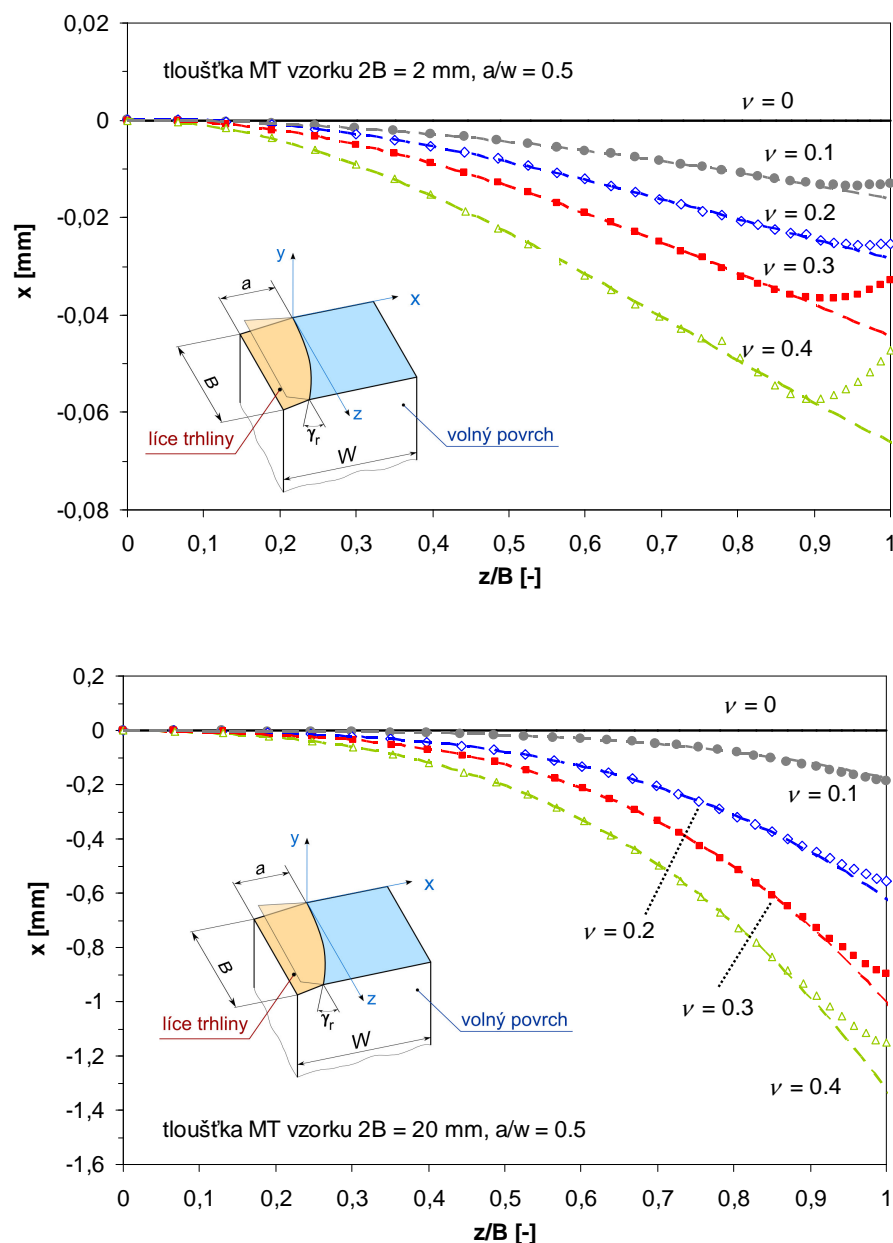
kde  $i$  je číslo bodu na čele trhliny,  $n$  udává číslo iterace a  $k_c$  je parametr závislý na stabilitě řešení (obvykle  $k_c = 0,1 \div 1$ ). Na nově vzniklém čele trhliny je následně určen exponent singularity napětí. Celý postup se opakuje až do okamžiku, kdy je exponent singularity napětí  $p$  konstantní podél celého čela trhliny. Hustota MKP sítě s detailem na čelo trhliny je znázorněna na obr. 6.



Obr. 6. Ukázka použité MKP sítě

Na obr. 7 je ukázka numericky odhadnutých tvarů čela trhliny pro MT vzorky o různých tloušťkách. Body na obrázku jsou výsledky z navrženého algoritmu, čárkované čáry znázorňují proložené výsledky polynomem třetího stupně s jehož pomocí lze odhadnout úhel  $\gamma$ . Z provedených numerických simulací je patrné, že je možné nalézt takový tvar čela trhliny, který vykazuje konstantní exponent singularity napětí v každém svém místě a dá se tedy předpokládat, že i rychlost šíření únavové trhliny bude v každém místě stejná. Dále poznamenejme, že v případě tenkých vzorků je čelo trhliny prakticky přímé, protože i pro Poissonovo číslo  $\nu = 0,4$  je maximální posun rohového bodu čela trhliny ve směru osy  $x$  pouze  $-0,07$  mm. U MT vzorku s tloušťkou  $2B = 20$  mm je tento posun přibližně  $-1,2$  mm.





Obr. 7. Porovnání tvaru čela trhlin MT vzorku s tloušťkou  $2B = 2 \text{ mm}$  (nahore) a tloušťkou  $2B = 20 \text{ mm}$  (dole) určené pro různá Poissonova čísla  $\nu$  [27]

Vlivem velikosti úhlu  $\gamma_r$  na rychlost šíření trhliny se zabýval např. Pook [23],[24]. S pomocí experimentálního pozorování navrhl jednoduchý vztah pro přibližné určení úhlu  $\gamma_r$  jako funkci Poissonova čísla  $\nu$  [25]:

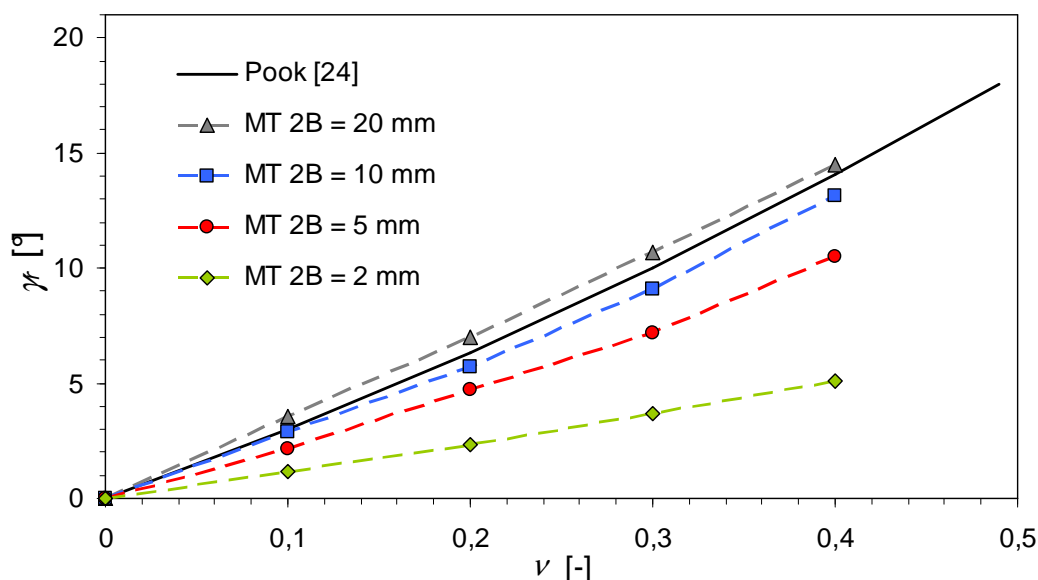
$$\gamma_r = 90^\circ + \operatorname{arctg}\left(\frac{\nu - 2}{\nu}\right). \quad (22)$$

Na obr. 8 je vynesena tato závislost černou čarou a označena jako „Pook“. Ostatní závislosti jsou výsledky získané pomocí v této práci navrženého postupu. Je zřejmé, že pro dostatečně tlusté vzorky je úhel  $\gamma_r$  získaný numericky v dobré shodě se vztahem (22). Ukazuje se však, že v případě

tenkých vzorků jsou numericky odhadnuté úhly  $\gamma_r$  výrazně menší, než udává vztah (22). Tabulka 1 přehledně shrnuje vybrané výsledky.

Pro tlustý vzorek ( $2B = 20$  mm) je hodnota exponentu singularity napětí na čele trhliny rovna  $p = 0,5$ . U tenkého vzorku bylo ale zjištěno, že dochází s rostoucím Poissonovým číslem k poklesu exponentu singularity napětí na čele trhliny. Na základě výpočtu rychlosti šíření únavové trhliny s pomocí  $K_{eff}$  dochází s poklesem  $p$  k poklesu rychlosti šíření únavové trhliny. Pokles  $p$  u tenkých vzorků tedy může částečně přispět k vysvětlení nižších rychlostí šíření trhliny experimentálně pozorovaných u tenkých zkušebních vzorků [24]. Dalším zjištěním, plynoucím z tabulky 1 je, že úhel  $\gamma_r$  je závislý nejen na Poissonově čísle, ale i na tloušťce zkušebního tělesa.

Z provedených analýz je tedy patrné, že rychlost šíření trhliny je možné predikovat jak u tenkostěnných konstrukcích, tak i v oblastech ovlivněných rohovou singularitou. V inženýrských aplikacích se většinou vliv tloušťky tělesa, případně rohové singularity, nebere v úvahu. Dodejme však, že pro dostatečně tlustá tělesa je možné vliv volného povrchu na chování trhliny zanedbat.



Obr. 8. Závislost úhlu  $\gamma_r$  na hodnotě Poissonova čísla  $\nu$  a tloušťce zkušební vzorku  $2B$  [27]

Tabulka 1. Vliv tloušťky vzorku a Poissonova čísla na úhel  $\gamma_r$  a hodnotu exponentu singularity napětí  $p$

tloušťka vzorku $2B$ [mm]		Poissonovo číslo $\nu$				
		0	0,1	0,2	0,3	0,4
2	úhel $\gamma_r$	0°	1,32°	2,61°	3,87°	5,21°
	exponent singularity napětí $p$	0,5	0,496	0,493	0,486	0,475
20	úhel $\gamma_r$	0°	2,9°	7,4°	12,2°	13,7°
	exponent singularity napětí $p$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

## 6.4 CHOVÁNÍ TRHLINY V GRADIENTNÍM MATERIÁLU

Chceme-li modelovat šíření trhliny v gradientních materiálech, např. ve svarovém spoji polymerních trubek, je nutno vzít v úvahu i případnou změnu materiálových vlastností, způsobenou např. technologickými podmínkami svařovacího procesu. Jak bylo popsáno dříve, během působení svařovacího tlaku a teploty dochází ke změně materiálových vlastností uvnitř svarového spoje. Tuto změnu materiálových vlastností (zde modulu pružnosti v tahu  $E$ ) je možno modelovat pomocí dvojité mocninné funkce:

$$E(z) = h_1(z)E_{max} + [1 - h_1(z)]E_{min} \quad \text{pro} \quad 0 \leq z \leq t_{GR}/2, \quad (23a)$$

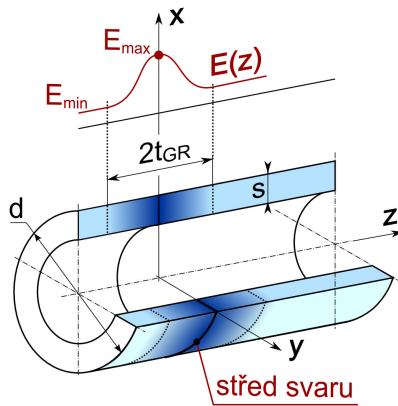
$$E(z) = h_2(z)E_{max} + [1 - h_2(z)]E_{min} \quad \text{pro} \quad t_{GR}/2 \leq z \leq t_{GR}, \quad (23b)$$

kde  $E_{max}$  je maximální naměřený modul pružnosti v tahu uprostřed svarového spoje,  $E_{min}$  odpovídá modulu pružnosti v tahu základního materiálu trubky,  $2t_{GR}$  je šířka ovlivněné vrstvy,  $z$  je souřadnice, viz obr. 9. Funkce  $h_1(z)$  a  $h_2(z)$  lze určit následovně:

$$h_1(z) = \frac{1}{2} \left( \frac{z}{t_{GR}/2} \right)^{p_s} \quad 0 \leq z \leq t_{GR}/2, \quad (24a)$$

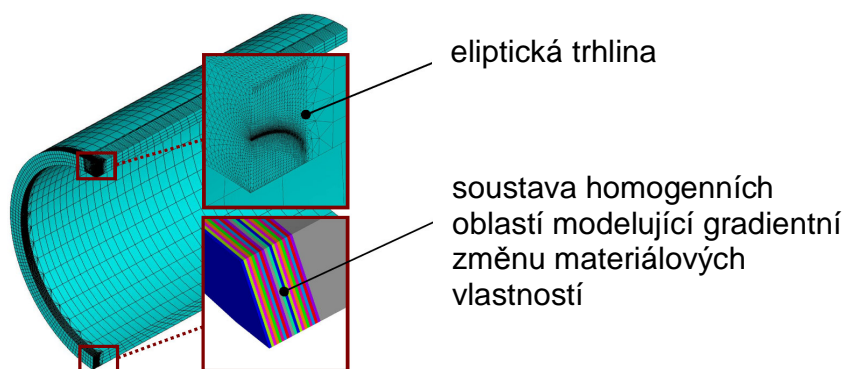
$$h_2(z) = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{t_{GR} - z}{t_{GR}/2} \right)^{p_s} \quad t_{GR}/2 \leq z \leq t_{GR}, \quad (24b)$$

kde  $p_s$  je stupeň polynomu určující změnu materiálových vlastností.



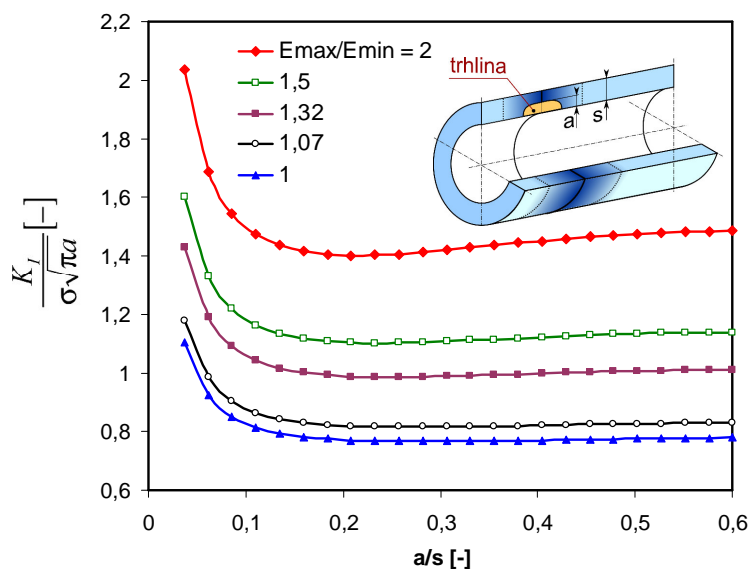
Obr. 9. Schéma změny modulu pružnosti  $E$  ve svaru polymerního potrubí

V práci [29] byla k popisu gradientní změny materiálových vlastností využita rovnoměrná diskretizace materiálových vlastností. Byl studován vliv gradientní oblasti na chování axiálně orientované trhliny, která se iniciuje uprostřed svaru. Změna materiálových vlastností byla definována pomocí dvaceti homogenních oblastí, které měly modul pružnosti odpovídající středu konkrétní homogenní oblasti. Ukázka MKP sítě a barevně odlišených homogenních oblastí s rozdílnými materiálovými vlastnostmi je na obr. 10.



Obr. 10. Ukázka použité MKP sítě a homogenních oblastí modelující gradientní změnu materiálových vlastností [29]

Ukázalo se, že gradientní oblast, způsobená tepelně-mechanickým ovlivněním při svařování polymerů, zapříčiní výrazný nárůst součinitele intenzity napětí v nejhlubším místě trhliny, viz obr. 11.



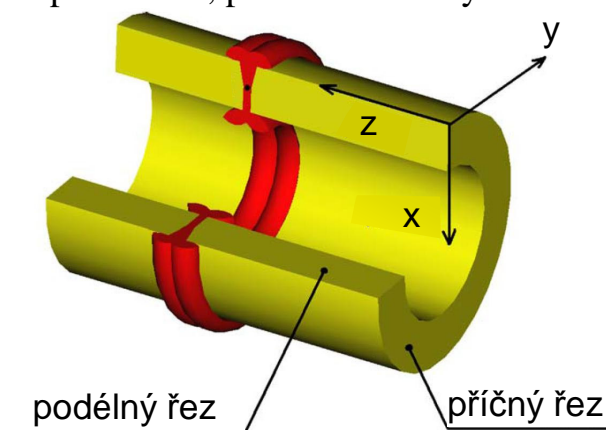
Obr. 11. Vliv gradientní změny materiálových vlastností ve svaru polymerních trubek na hodnotu součinitele intenzity napětí v nejhlubším místě trhliny [29]

Lze předpokládat, že pokud uprostřed svaru potrubí vznikne trhlina, bude se s velkou pravděpodobností šířit rychleji než v základním materiálu trubky. To v důsledku povede k výrazné redukci životnosti konstrukce. Na základě provedených simulací [29],[30] byl navržen konzervativní, jednoduše aplikovatelný vztah pro určení přibližné hodnoty  $K_I^{přibl.}$  ze známého řešení  $K_I^{homogenní\ trubka}$ , např. z [21] a experimentálně zjištěného poměru  $E_{max}/E_{min}$ :

$$K_I^{přibl.} = K_I^{homogenní\ trubka} \cdot (E_{max}/E_{min}) . \quad (25)$$

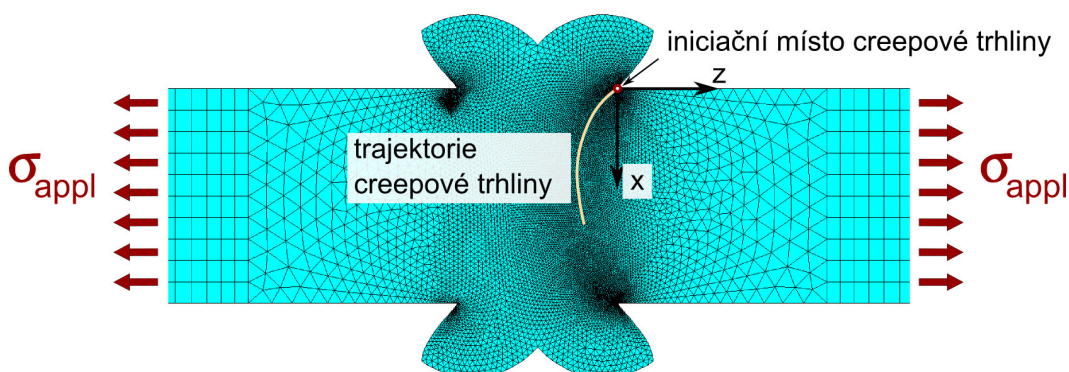
Uvedený vztah dává konzervativní výsledky s chybou menší než 5% do poměru  $E_{max}/E_{min} < 1,5$ .

Při svařovacím procesu polymerních potrubí dochází také k vytvoření specifického tvaru svarového výronku, viz obr. 12 (znázorněn červeně). V současnosti neexistuje jednomyslný názor na přítomnost výronku během provozu a testování svařovaných potrubí. V praxi se někdy výronek odstraňuje pomocí speciálních, poloautomatických zařízení.



Obr. 12. Znáznornění svarového výronku, který vzniká během svařovacího procesu polymerního potrubí [15]

Kvalita svarových spojů polymerních potrubí je nejčastěji hodnocena experimentálně pomocí zkušebních vzorků podélně vyříznutých ze svařeného potrubí. Tyto zkušební vzorky jsou pak následně vystaveny specifickým zátěžným stavům, např. tahovému [3] nebo ohybovému [26] namáhání. Z důvodu zkrácení doby zkoušky jsou testy obvykle prováděny za zvýšených teplot. Cílem práce [31] bylo posoudit vliv přítomnosti výronku na chování trhliny u zkušebních vzorků obsahující svar. Úloha byla numericky simulována pomocí dvojdimenzionálního modelu za podmínky rovinné deformace. Ukázka numerického modelu je na obr. 13.



Obr. 13. Ukázka MKP sítě a okrajových podmínek modelu zkušební vzorku obsahující svarový výronek

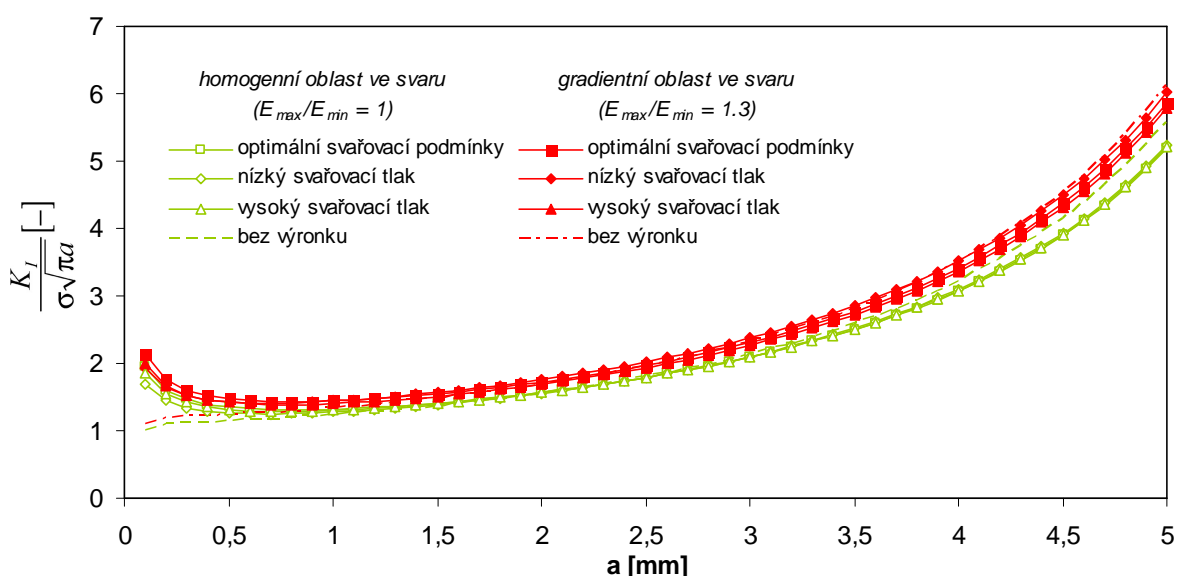
Geometrie svarového výronku je závislá na rozměrech potrubí a svařovací teplotě a svařovacím tlaku. Proto byly studovány různé geometrie výronku, viz obr. 14.



Obr. 14. Zkušební vzorky se svarovým výronkem; optimální svařovací podmínky (vlevo), nízký svařovací tlak (uprostřed), vysoký svařovací tlak (vpravo)

Geometrie svarových výronků, získané pro různé svařovací teploty, jsou velmi podobné svarovým výronkům vytvořeným při nízkém, resp. vysokém svařovacím tlaku. Proto byly modelovány pouze výše znázorněné geometrie výronků. Pomocí numerických simulací byl zjišťován vliv gradientní změny materiálových oblastí na trajektorii trhliny a na hodnotu součinitele intenzity napětí.

V prvotních analýzách bylo potvrzeno, že ve vrubu, vytvořeném v místě přechodu svarového výronku do stěny potrubí, je zvýšená koncentrace napětí, a tedy v tomto místě dochází k iniciaci trhliny. Proto byla ve vrubu modelována iniciační trhlina. Na obr. 15 je vyneseno odhadnutý součinitel intenzity napětí pro trhliny nacházející se ve vzorcích obsahující studované geometrie svarového výronku.



Obr. 15. Součinitel intenzity napětí odhadnutý pro trhliny ve vzorcích obsahující studované geometrie svarového výronku

Lze říci, že vliv gradientní změny materiálových vlastností způsobí mírný nárůst hodnoty součinitele intenzity napětí. V případě velmi krátkých trhlin je patrný rozdíl mezi součinitelem intenzity napětí pro vzorky se svarovým výronkem a bez výronku. Tento rozdíl lze vysvětlit koncentrací napětí ve vrubu, která způsobí nárůst součinitele intenzity napětí. U zkušebních vzorků se ale často vytvářejí zářezy z důvodu přesné lokalizace vrcholu trhliny. Pro běžné zkoušky tedy bude vliv koncentrace napětí ve vrubu zanedbatelný.

## 7. ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá lomově-mechanickým popisem chováním trhliny v blízkosti materiálové nehomogenity. V práci je nejprve studován vliv volného povrchu (rozhraní homogenního materiálu a okolního prostředí). Z experimentálního pozorování je zřejmé, že čelo únavové trhliny, protínající volný povrch tělesa, je v jeho blízkosti zakřiveno. Tuto skutečnost nelze korektně vysvětlit ani popsat s využitím klasické lineárně elastické lomové mechaniky. Využitím zobecněné lomové mechaniky je možné popsat chování trhliny v blízkosti volného povrchu tělesa, kde je pole napětí významně ovlivněno rohovou singularitou. Druhým limitním případem materiálové nehomogenity je gradientní změna materiálových vlastností, která je studována ve druhé části této práce. Na příkladu svaru polymerních potrubí je zde popsána metodika modelování gradientních materiálů.

Dosažené výsledky disertační práce je možné shrnout následovně:

- 1) Na základě numerického modelování taženého vzorku (MT) s průchozí trhlinou se potvrdilo, že v blízkosti volného povrchu tělesa dochází ke změně singulárního pole napětí v okolí čela trhliny. Ukázalo se, že změna charakteru singulárního pole napětí je odlišná pro tenkostěnná a pro tlustostěnná tělesa.
- 2) Pro dostatečně dobrý popis pole napětí podél čela přímé trhliny je možné využít dvouparametrového popisu v případě tlustostěnných těles. Pro tenkostěnná tělesa se jeví jako vhodný popis pomocí zobecněného součinitele intenzity napětí.
- 3) V práci je odvozen vztah mezi zobecněným součinitelem intenzity napětí  $H$  a efektivním součinitelem intenzity napětí  $K_{eff}$ . Tato závislost je odvozena za předpokladu stejného lomového chování dvou různých singulárních koncentrátorů při stejné hodnotě faktoru hustoty deformační energie.
- 4) Hlavním dosaženým cílem disertační práce je postup, který za pomoci numerických metod vede k odhadu tvaru čela trhliny u tenkostěnných těles. Tento postup využívá energetické bilance před čelem trhliny, z níž vyplývá, že rychlost šíření trhliny je stejná po celé délce čela trhliny. Je ukázána souvislost mezi rychlostí šíření únavové trhliny a exponentem singularity napětí. Tvar čela trhliny je iteračním způsobem měněn tak,



aby byl exponent singularity napětí konstantní v každém bodě čela trhliny. V případě tenkostěnných konstrukcí dochází vždy k interakci jednotlivých rohových singularit, což dokládá pokles exponentu singularity napětí. Ve zde prezentovaném postupu je interakce rohových singularit vzata do úvahy. Dosud se soudilo, že společně se vzrůstajícím Poissonovým číslem vzrůstá i úhel  $\gamma_r$  mezi čelem trhliny a normálou k volnému povrchu. Z výsledků, zde popsanych, lze rovněž usuzovat, že s klesající tloušťkou tělesa dochází k poklesu úhlu  $\gamma_r$ . Je tedy zřejmé, že úhel  $\gamma_r$  je ovlivňován Poissonovým číslem materiálu a tloušťkou tělesa.

- 5) V disertační práci jsou představeny různé přístupy k simulaci gradientních materiálů pomocí MKP. V práci jsou prezentovány tři z možných postupů, přičemž jako nejvýhodnější z hlediska výpočtáře se jeví definice materiálových vlastností pomocí okrajových podmínek úlohy. Tento postup nevyžaduje žádné úpravy na modelu geometrie a tím značně urychluje dobu přípravy výpočtového modelu.
- 6) Porovnáním odhadnutých hodnot součinitele intenzity napětí s daty nalezenými v literatuře a analytickým řešením bylo možné konstatovat velmi dobrou shodu všech tří uvažovaných postupů s analytickým řešením.
- 7) Jako příklad gradientního materiálu je zde uveden svar polymerních součástí. S pomocí dvojdimenzionálních a trojdimenzionálních numerických modelů jsou určovány lomové charakteristiky s cílem kvantifikovat vliv materiálové nehomogenity a svarového výronku na lomové chování trhliny. Ukázalo se, že gradientní oblast ve svaru významně zvyšuje hodnotu součinitele intenzity napětí, což v důsledku může vést k redukci životnosti celé konstrukce. Dále bylo zjištěno, že přítomnost svarového výronku na zkušebním vzorku neovlivní životnost zkušebního vzorku při creepové zkoušce.

Metody a postupy použité v této práci mají obecnou platnost a lze je využít i pro řešení celé řady jiných úloh. Výsledky a závěry autorovy práce by v budoucnu měly usnadnit spolehlivější odhad životnosti tenkostěnných konstrukcí a komponent s gradientní změnou materiálových vlastností. Závěrem lze konstatovat, že cíle disertační práce byly splněny, což je doloženo mimo jiné i seznamem publikovaných prací autora.

Disertační práce byla řešena v rámci grantových projektů a v úzké spolupráci se zahraničními pracovišti, zejména:

- 1) Polymer Competence Center Leoben (PCCL), Rakousko – prof. Gerald Pinter, Dr. Andreas Frank. V rámci této spolupráce byla řešena problematika šíření creepových trhlin v polymerním potrubí, přičemž vznikly publikace [VII],[VIII],



- 2) Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU), Německo – prof. Ralf Lach, prof. Wolfgang Grellmann. Ve spolupráci s pracovníky MLU byl studován vliv materiálové nehomogenity, vzniklé v průběhu svařování polymerních potrubí. Během spolupráce vznikly tyto společné publikace: [IV],[XIII].
- 3) University of Oviedo, Španělsko – prof. Alfonso Fernández-Canteli. Tématem spolupráce bylo zpřesnění popisu pole napětí v blízkosti volného povrchu tělesa. V průběhu řešení disertační práce byly uskutečněny dvě krátkodobé stáže doktoranda na tomto pracovišti. V rámci spolupráce vznikla publikace [III].

Dosažené výsledky jsou publikovány v impaktovaných a recenzovaných časopisech a ve sbornících významných vědeckých konferencí.

Výsledky obsažené v této práci byly dosaženy v rámci řešení grantů a projektů:

#### **Grantové agentury České republiky**

106/09/H035	Víceúrovňový design pokrokových materiálů
106/05/H008	Víceúrovňový design pokrokových materiálů
101/09/0867	Odhad únavového poškození tenkostěnných struktur
106/09/0279	Mechanismy lomového porušování vrstevnatých polymerních prostředí
101/09/J027	Souvislost mezi strukturálními změnami, rozvojem poškození a šířením trhlin ve svařovaných polymerních součástech

#### **Specifického výzkumu na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně**

FSI-J-10-41	Numerické modelování mechanických vlastností a porušení vícefázových polymerních materiálů
FSI-S-10-12	Meso/makro-mechanika deformačních a lomových procesů v progresivních materiálech a strukturách
FSI-J-11-38	Aplikace nových postupů zobecněné lomové mechaniky na stanovení lomového chování inženýrských konstrukcí
FAST/FCH/FSI-S-11-1	Chování trhlin/mikrotrhlin v kompozitech s křehkou maticí

## 8. VYBRANÉ PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA

### Publikované práce:

- [I] Ševčík, M., Hutař, P., Zouhar, M., Náhlík, L.: Numerical estimation of the fatigue crack front shape for a specimen with finite thickness. *International Journal of Fatigue* 2011 – v tisku. (IF = 1,602)
- [II] Hutař, P., Ševčík, M., Náhlík, L., Knésl, Z.: Fatigue Crack Shape Prediction Based on the Stress Singularity Exponent. *Key Engineering Materials*, 488-489, 178-181 2012.
- [III] Hutař, P., Ševčík, M., Náhlík, L., Zouhar, M., Seitzl, S., Knésl, Z., Fernández-Canteli, A.: Fracture mechanics of the three-dimensional crack front: vertex singularity versus out of plain constraint descriptions. *Procedia Engineering*, 2010, roč. 2, č. 1, s. 2095-2102.
- [IV] Ševčík M., Hutař, P., Náhlík, L., Lach, R., Knésl, Z., Grellmann, W.: Crack Growth Modeling in a Specimen with Polymer Weld. *Key Engineering Materials* 488-489, 158-161, 2012.
- [V] Ševčík M., Hutař, P., Náhlík, L.: Description of the stress distribution around the crack front in the case of thin structures. *Bulletin of Applied Mechanics* 6(22), 30-33, 2010.
- [VI] Ševčík, M., Hutař, P., Náhlík, L., Knésl, Z.: An evaluation of the stress intensity factor in functionally graded materials. *Applied and Computational Mechanics*, 2009, roč. 3, č. 2, ISSN: 1802- 680X.
- [VII] Hutař, P., Ševčík, M., Náhlík, L., Frank, A., Mitev, I., Pinter, G.: Numerical Simulation of the Failure Behavior of PE Pressure Pipes with Additional Loads. Sborník konference *ANTEC 2009*, Chicago, USA.
- [VIII] Hutař, P., Ševčík, M., Náhlík, L., Pinter, G., Frank, A., Mitev, I.: A numerical methodology for lifetime estimation of HDPE pressure pipes. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011 – v tisku. (IF = 1.571)
- [IX] Ševčík, M., Hutař, P., Náhlík, L.: Crack behaviour in the welded polyolefin pipe. *Mechanics of Composite Materials* 47 (2-3), 263-270, 2010. (IF = 0,421).
- [X] Hutař, P., Náhlík, L., Šestáková, L., Ševčík, M., Knésl, Z., Nezbedová, E.: A Fracture Mechanics Assessment of Surface Cracks Existing in Protective Layers of Multilayer Composite Pipes, *Composite Structures* 92 (2010), 1120-1125. (IF = 2,028)
- [XI] Ševčík M., Hutař, P., Náhlík, L., Knésl Z.: The Effect of Polymer Pipe Weld Geometry on Creep Lifetime. *Key Engineering Materials*, Vol. 465, 175-178, 2011.

### Práce zaslané k publikaci:

- [XII] Hutař, P., Zouhar, M., Knésl, Z., Náhlík, L., Ševčík, M.: Assessment of multilayer polymer pipes failure using a fracture mechanics approach. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* – v září 2011 zaslán manuscript. (IF = 1,513)
- [XIII] Ševčík, M., Hutař, P., Knésl, Z., Náhlík, L.: Estimation of a critical configuration of a crack arrested at the interface between two materials. *Computational Materials Science* – v říjnu 2011 zaslán manuscript. (IF = 1,458)
- [XIV] Ševčík M., Hutař, P., Náhlík, L., Lach, R., Knésl, Z., Grellmann, W. Crack propagation in welded polyolefin pipes. *International Journal of Structural Integrity* – v listopadu 2011 zaslán manuscript.

Kompletní přehled publikační aktivity Ing. Martina Ševčíka k datu odevzdání disertační práce

	publikováno nebo přijato k publikaci	zasláno k publikaci
impaktovaný časopis	4	2
recenzovaný časopis	8	1
sborník mezinárodní konference	8	-
sborník tuzemské konference	9	-

## 9. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Anderson, T.L.: *Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications*, 2nd edition, CRC Press Inc, 1995.
- [2] Bažant, Z.P., Estenssoro, L.F.: Surface singularity and crack propagation. *International Journal of Solids and Structures* 15, 405-426, 1979.
- [3] Beech, S. et al.: Harmonisation of polyethylene pipe buttfusion procedures and test methods. *Proceedings of Plastic Pipes XV*, September 20-22, Vancouver, Canada, 2010.
- [4] Ghahremani, F.: A numerical variational method for extracting 3D singularities. *International Journal of Solids and Structures* 27, 1371-1386, 1991.
- [5] Hessel, J.: Minimum service-life of buried polyethylene pipes without sand-embedding. *3R international* 40, *Special Plastic Pipes*, 4-12, 2001.
- [6] Hessel, J.: 50 Jahre Rohre aus Polyethylen - Eine ingenieurtechnische Betrachtung. *3R international* 45, 3/4, 128-133, 2006.
- [7] Hutař, P., Náhlík, L.: Influence of corner point singularity on crack behavior, *Engineering Mechanics* 2007, Svratka, 2007, CD.

- [8] Hutař, P., Náhlík, L., Knésl, Z.: Quantification of the influence of vertex singularities on fatigue crack behaviour, *Computational Materials Science* Vol. 45, 653–657, 2009.
- [9] Hutař, P., Náhlík, L., Knésl, Z.: The effect of a free surface on fatigue crack behaviour. *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, 1265-1269, 2010.
- [10] Hutař, P., Seitzl, S., Náhlík, L., Ševčík, M., Knésl, Z.: Stress distribution along the 3D crack front. Sborník konference *Computational Mechanics 2009*. Plzeň, Česká republika, 2009.
- [11] Hutař, P., Ševčík, M., Náhlík, L., Zouhar, M., Seitzl, S., Knésl, Z., Fernandéz-Canteli, A.: Fracture mechanics of the three-dimensional crack front: vertex singularity versus out of plain constraint descriptions. *Procedia Engineering*, 2010, roč. 2, č. 1, s. 2095-2102.
- [12] Klusák, J. *Lineárně elastická lomové mechanika V-vrubu*. Disertační práce na VUT v Brně, 2002.
- [13] Knésl, Z.: A criterion of V-notch stability, *International Journal of Fracture* 48, 79-83, 1991.
- [14] Knésl, Z.: The application of the strain energy density concept to the determination of a crack propagation direction initiated at a sharp notch tip. *Acta Technica ČSAV*, Vol. 38, No. 2, 221-234, 1993.
- [15] Leskovics, K., Kollár, M., Bárczy, P.: A study of structure and mechanical properties of welded joints in polyethylene pipes, *Material Science and Engineering A*, Vol. 419, 138-143, 2009.
- [16] Long, X., Delale, F.: The mixed mode crack problem in an FGM layer bonded to a homogeneous half-plane. *International Journal of Solids and Structures* 42, 3897-3917, 2005.
- [17] Majer, Z., Hutař, P., Náhlík, L.: Odhad iniciace trhliny pro ohýbaný vzorek s V-vrubem. *Problémy lomové mechaniky X*, 31-34, 2010.
- [18] Matos, P.F.P., Nowell, D.: Numerical modelling of corner point singularities and their effect on the closure behaviour of 3D fatigue cracks. *Proceedings of Iberian Conference on Fracture and Structural Integrity*, March 17-19, Porto, Portugal, 2010.
- [19] Miyamoto, Y. et al.: *Functionally Graded Materials: Design, Processing and Applications*. 1st edition, Springer, 1999.
- [20] Náhlík, L.: *Šíření únavových trhlin v okolí rozhraní dvou elastických materiálů*. Disertační práce VUT v Brně, 2002.
- [21] Newman, J., Raju, I.S.: Stress-Intensity Factors for Internal Surface Cracks in Cylindrical Pressure Vessels, *Journal of Pressure Vessel Technology* 102, 342-346, 1980.
- [22] Pook, L.P.: *Metal fatigue: what is it, why it matters*. Springer, 2007.
- [23] Pook, L.P. On fatigue crack paths. *International Journal of Fatigue* 17 (1), 5-13, 1995.

- [24] Pook, L.P.: Some implications of corner point singularities. *Engineering Fracture Mechanics* 48 (3), 367-378, 1994.
- [25] Pook, L.P.: *Crack Paths*. WITpress: Southampton, 2002.
- [26] Sandstrum, S.: A New Qualification Method for Butt Fusion Joining of Polyethylene (PE) Pipe and Fittings in the United States. *Proceedings of Plastic Pipes XV*, September 20-22, Vancouver, Canada, 2010.
- [27] Ševčík, M., Hutař, P., Zouhar, M., Náhlík, L.: Numerical estimation of the fatigue crack front shape for a specimen with finite thickness. *International Journal of Fatigue* 2011, článek v tisku.
- [28] Ševčík M., Hutař, P., Zouhar, M., Náhlík, L.: Numerical determination of the crack front shape for a specimen with finite thickness. Sborník konference *Mechanical Fatigue of Metals* 2010, Opole.
- [29] Ševčík, M., Hutař, P., Náhlík, L.: Crack behaviour in the welded polyolefin pipe. *Mechanics of Composite Materials* 47 (2-3), 263-270, 2010.
- [30] Ševčík, M., Hutař, P., Náhlík, L.: Simulace šíření trhliny ve svaru polyolefinových trubek. *Víceúrovňový design pokrokových materiálů*. Brno: 2009. 45-52. ISBN: 978-80-254-6070- 2.
- [31] Ševčík M., Hutař, P., Náhlík, L., Lach, R., Knésl, Z., Grellmann, W.: Crack Growth Modeling in a Specimen with Polymer Weld. *Key Engineering Materials* 488-489, 158-161, 2012.
- [32] Tilbrook, M.T.: *Fatigue crack propagation in functionally graded materials*. Disertační práce School of Materials Science & Engineering, University of New South Wales, Austrálie, 2005.
- [33] Toribio, J. et al.: Numerical modelling of crack shape evolution for surface flaws in round bars under tensile loading. *Engineering Failure Analysis* 16, 618-630, 2009.
- [34] Veselý, P., et al.: Mechanical and fracture behaviour in plastic pipes with and without butt-welded joints, in *13. International Conference Polymeric Materials* 2008, Abstracts, Halle/Saale, 2008.
- [35] Williams, M.L.: On the stress distribution at the base of a stationary crack. *Journal of Applied Mechanics* 24, 109-114, 1957.
- [36] Williams, M.L.: Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension. *Journal of Applied Mechanics* 74, 526-528, 1952.

## CURRICULUM VITAE

**Jméno a příjmení:** Ing. Martin Ševčík

**Datum narození:** 4. září 1983

**Národnost:** česká

**Rodinný stav:** ženatý

**Adresa:** Legionářská 523, 679 06 Jedovnice

**E-mail:** sevcik@ipm.cz

## VZDĚLÁNÍ:

- 2008 - dosud doktorské stadium, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně  
obor: Inženýrská mechanika  
téma disertační práce: Vliv volného povrchu tělesa a gradientní změny materiálových vlastností na chování trhliny
- 2002 - 2008 magisterské stadium, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně  
obor: Aplikovaná mechanika  
téma diplomové práce: Výpočtové modelování deformačně-napěťových stavů čelního soukolí pomocí MKP
- 1998 - 2002 Střední průmyslová škola Jedovnice

## PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI:

- 2008 - dosud odborný pracovník na Ústavu fyziky materiálů Akademie Věd ČR, v. v. i.;

## ODBORNÁ ČINNOST:

- Člen řešitelského týmu grantových projektů GAČR, řešených na ÚFM AV ČR,
- Navrhovatel a spolunavrhovatel dvou schválených juniorských badatelských projektů specifického výzkumu na FSI VUT v Brně
- Člen organizačního výboru konferencí *Applied mechanics 2011* – Velké Bílovice, *Víceúrovňový design pokrokových materiálů 2011* - Brno
- Vyzvaná přednáška na *Universidad De Oviedo*
- Absolvent specializovaných kurzů, seminářů a letních škol, např:
  - 1) *Composite Materials Technology*, Dánsko (2 týdny)
  - 2) *Processing, modelling and design of multi-layered and graded material systems – 5<sup>th</sup> intensive session of PhD path*, Itálie (2 týdny)
- Aktivní účast na mezinárodních vědeckých konferencích, např:
  - 1) *Fracture and Damage Mechanics 2011*, Chorvatsko
  - 2) *Mechanics of Composite Materials 2010*, Lotyšsko
  - 3) *Crack Paths 2009*, Itálie

## **ABSTRACT**

This thesis was written under the supervision of Assoc. Prof. Luboš Náhlík, Ph.D. and Assoc. Prof. Pavel Hutař, Ph.D. The topic of this thesis is the study of a free surface effect and gradient change of material properties on a crack behavior. The common theme of the work is a fracture mechanics description of a crack behavior near a material nonhomogeneity. Here, the material nonhomogeneity can be understood either as a boundary of a body (interface between body and surrounding) or as a continuous change of material properties. The thesis is introduced by a review part where the brief introduction to fracture mechanics is described. This part follows with the fracture mechanics description of the graded materials. The problem formulation and the main aims of the thesis are stated in the following chapter. The core of this work is the fracture mechanical description of a crack propagating near the material nonhomogeneity. The thesis focuses on a stress field description near the free surface of the body where a change in a type of the singular stress field occurs. Methods used in generalized fracture mechanics are applied here to describe the stress field near the free surface. The difference between crack behavior in thin-walled and thick-walled structures is shown and supplied by relevant examples. Methods and procedures used are later utilized for estimation of a crack behavior in graded structures. The thesis is concluded by the discussion of obtained results in appropriate context.